

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕАНДРОВОЙ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Н. Д. МАЛЮТИН, П. П. ГАЛИНСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры ТОЭ)

В настоящей статье рассмотрены пути миниатюризации полосковых передающих линий при сохранении линейности их фазочастотных характеристик и произведен расчет погонных емкостей и волновых сопротивлений меандровой линии.

Уменьшение габаритов полосковых линий задержки можно осуществить двумя путями: использованием для подложек материалов с большими значениями относительных диэлектрической и магнитной проницаемости  $\epsilon_r$  и  $\mu_r$ , применением зигзагообразной укладки центральной токонесущей полоски и многослойного печатного монтажа. Однако увеличение  $\epsilon_r$  и  $\mu_r$  требует уменьшения ширины центральной полоски и перехода от печатной к пленочной технологии, имеющей большую разрешающую способность, а сокращение габаритов за счет более плотного размещения «витков» проводника приводит к непропорциональности между фазовой задержкой в линии и геометрической длиной токонесущей полоски, а также к нарушению согласования линии по характеристическому сопротивлению, определенному для прямой линии. Конструкция зигзагообразной линии показана на рис. 1, а поперечное сечение — на рис. 2.

Если количество проводников велико, то крайние проводники будут вносить маленькие погрешности в фазовый сдвиг [1], и фазовая задержка в линии может быть определена так:

$$\varphi = N_1 \psi + N_2 \beta l_2, \quad (1)$$

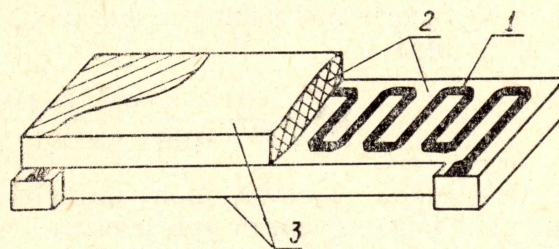


Рис. 1. Конструкция меандровой полосковой линии: 1 — меандровая токопроводящая полоска; 2 — диэлектрические подложки; 3 — заземляемые основания

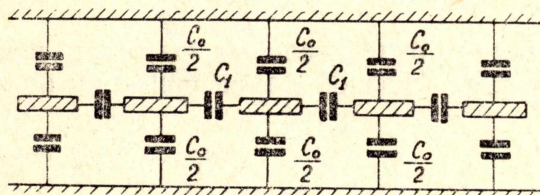


Рис. 2. Поперечное сечение меандровой линии



где

$\psi$  — разность фаз напряжений в начале и конце изгиба одной полоски;

$N_1$  — число связанных полосок;

$N_2$  — число полосок, соединяющих связанные проводники;

$\beta$  — фазовая постоянная ТЕМ-волны в несвязанной линии, имеющей одинаковые размеры с зигзагообразной линией;

$l_2$  — длина соединяющих полосок.

Угол  $\psi$  может быть найден [1] из уравнения

$$\cos \psi = \frac{\sqrt{4m^2(m^2 - 1) \cos \beta l_1 + 1} - 1}{2(m^2 - 1) \cos \beta l_1} \quad (2)$$

$l_1$  — длина связанных полосок;

где

$m^2 = \frac{C_0 + 2C_1}{C_0}$  зависит от соотношения собственной  $C_0$  и взаим-

ной  $C_1$  емкостей (рис. 2), а фазовая постоянная связана с углом  $\psi$  выражением

$$\cos \beta l_1 = \frac{\cos \psi}{\cos^2 \psi + m^2 \sin^2 \psi}. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) видно, что зигзагообразная полосковая структура не вносит фазовых искажений при значениях  $m^2$ , близких к единице. Однако этот случай соответствует слабой связи между полосками меандра и большим габаритом линии. Пользуясь (1) и (3), легко установить связь между  $m^2$  и допустимым отклонением фазового набега  $\Delta\varphi$  изогнутой линии от фазового набега в выпрямленной линии той же длины

$$m^2 = \frac{\cos \psi - \cos^2 \psi \cos (\psi + \Delta\varphi/N_1)}{\sin^2 \psi \cos (\psi + \Delta\varphi/N_1)}. \quad (4)$$

На низкой частоте, при которой  $\beta l_1$  меньше  $10 = 15^\circ$ , угол  $\psi$  можно аппроксимировать уравнением

$$\psi = \beta l_1 \frac{1}{\sqrt{2m^2 - 1}}. \quad (5)$$

Реальный фазовый сдвиг в меандровой линии изменяется с частотой нелинейно, так как  $\frac{d\psi}{d\beta l_1}$  увеличивается с ростом частоты [1].

Величина относительных фазовых искажений, определяемых как отклонение фазовой характеристики от линейной, записывается

$$\delta\varphi = \frac{N_1\psi - N_1\beta l_1 \frac{1}{\sqrt{2m^2 - 1}}}{N_1\beta l_1 \frac{1}{\sqrt{2m^2 - 1}} + N_2\beta l_2}. \quad (6)$$

Для оптимизации структуры по любому критерию к уравнениям (1) — (6) необходимо добавить выражения, устанавливающие связь между первичными электрическими параметрами  $C_0$ ,  $C_1$  и геометрическими размерами структуры и свойствами материала подложек.

К основным параметрам линий с ТЕМ-волной обычно относят [3] емкости при четном и нечетном возбуждении  $C_{0e}$  и  $C_{0o}$ , а также волновые сопротивления при четном и нечетном возбуждении  $Z_{0e}$  и  $Z_{0o}$ .



Между выбранными первичными параметрами существует следующая связь:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{C_{00} + C_{0e}}{2}; \quad 2C_1 = \frac{C_{00} - C_{0e}}{2}; \\ C_{00} &= C_0 + 2C_1; \quad C_{0e} = C_0 - 2C_1; \\ Z_{00} &= \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{3 \cdot 10^8 C_{00}}; \quad Z_{0e} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{3 \cdot 10^8 C_{0e}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Эти параметры полностью характеризуют меандровую линию. По ним могут быть найдены фазовая задержка, волновое и входное сопротивление [1].

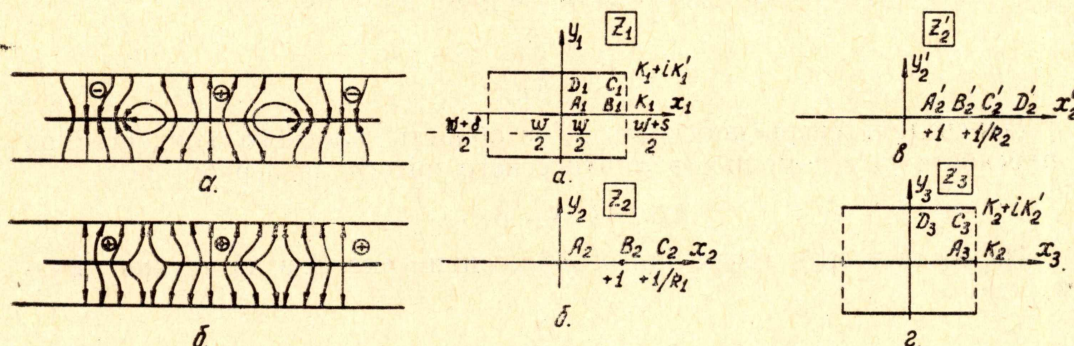


Рис. 3. Нечетное (а) и четное (б) возбуждение полосок меандровой линии

Рис. 4. Последовательность конформных отображений ячейки четного возбуждения (а) на каноническую область плоского конденсатора (с)

Четное и нечетное возбуждения полосок показаны на рис. 3, б и а соответственно. Емкость полосок при четном возбуждении равна  $N_1 C_{0e}$ , где  $C_{0e}$  — емкость одной полоски можно найти для элементарной ячейки четного возбуждения (рис. 4, а). Ячейка ограничена частью экранов и магнитными стенками (пунктирные линии), отделяющими область поля двух соседних ячеек. Емкость полосок при нечетном возбуждении также равна  $N_1 C_{00}$ , где  $C_{00}$  — емкость одной полоски, а в отличие от ячейки четного возбуждения, ячейка для нечетного типа возбуждения включает вертикальные металлические стенки.

Для нахождения погонных емкостей использовался метод конформных отображений [2], позволивший решить задачу нахождения первичных параметров по заданным размерам. Для отображения внутренней области ячеек на каноническую область плоского конденсатора и нахождения функции была проделана следующая последовательность операций (рис. 4).

Функции Якоби

$$z_2 = sn(z_1, k_1)$$

переводит прямоугольник в плоскости  $z_1$ , представляющий ячейку четного типа возбуждения на плоскость  $z_2$  с соответствием точек, показанным на рис. 4, а, б. При этом координата точки  $A_1$  выражается через ширину полоски

$$z_1(A_1) = w/2 = a,$$

а координаты точки  $A_1$  — в плоскости  $z_2$

$$z_2 = sn(A_1, k_1) = d.$$



Входящая в выражение для  $d$  величина  $k_1$  называется модулем эллиптической функции  $sn(z_1, k_1)$  и может быть найдена с помощью таблиц [2] для отношения полных эллиптических интегралов первого рода  $K_1$  и  $K_1'$ , равного

$$\frac{K_1}{K_1'} = \frac{w + s}{b}.$$

Далее используем линейное преобразование

$$z_2' = \frac{z_2}{d}.$$

Оно переводит плоскость  $z_2$  саму на себя. Точка  $A_2$  перемещается при этом в  $+1$ , а точка  $C_2$  будет иметь координату (рис. 3, в)

$$c = \frac{1}{k_1 d}.$$

Переведем теперь плоскость  $z_2'$  в область плоского конденсатора  $z_3$  с помощью эллиптического интеграла первого рода

$$z_3 = F(z_2', k_2).$$

Из соответствия точек при отображении (рис. 4, в, г) устанавливаем, что

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{k_2},$$

откуда

$$k_2 = k_1 d.$$

Так как координаты точек  $A_1$  и  $C_1$  в плоскости  $z_3$  имеют соответственно значения  $K_2$  и  $K_2 + iK_2'$ , то погонная емкость и режим четного возбуждения найдется по формуле плоского конденсатора

$$C_{0e} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{4K_2}{K_2'}, \quad (8)$$

где  $K_2$  и  $K_2'$  — полные эллиптические интегралы первого рода, зависящие от модулей

$$k_2 \text{ и } k_2' = \sqrt{1 - k_2^2}.$$

Последовательность отображения ячейки нечетного типа отличается от приведенной отсутствием промежуточного линейного преобразования. Исходя из этого:

$$C_{00} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{4K_3}{K_3'}, \quad (9)$$

где полные эллиптические интегралы первого рода  $K_3$  и  $K_3'$  зависят от модулей  $k_3$  и  $k_3' = \sqrt{1 - k_3^2}$ , а  $k_3 = d$ .

Таким образом, вычисление емкостей по формулам (8) и (9) сводится к расчету модулей  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  и значений эллиптических интегралов. По выражениям (8), (9) и (7) проведен расчет погонных емкостей  $C_{00}$ ,  $C_{0e}$ ,  $C_0$  и  $C_1$  для меандровой линии, зазор между полосками которой  $s$  равен ширине токонесущей полоски  $w$ . Расчетные кривые показаны на рис. 5. На рис. 6 приведена зависимость волновых сопротивлений в режимах четного  $Z_{0e}$  и нечетного  $Z_{00}$  возбуждения от  $w/b$  при  $s/b = 0,5$ .



Таким образом, формулы (7—9), устанавливая дополнительные связи между электрическими и конструктивными параметрами, позволяют добиться оптимальных характеристик полосковых меандровых линий задержки по следующим критериям: линейности фазочастотной характеристики, размерам, свойствам материала.

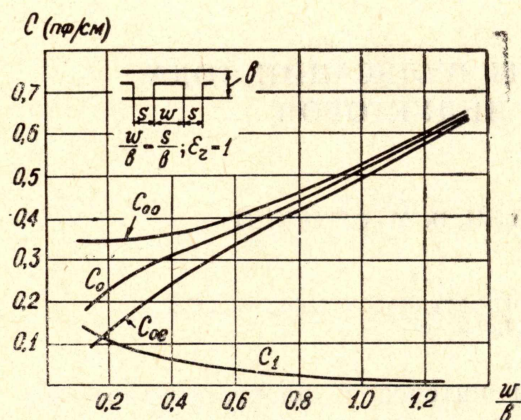


Рис. 5. Зависимость погонных емкостей меандровой линии от отношения  $w/b$  при  $w/b = s/b$  (диэлектрик — воздух). Вверху показаны поперечные размеры структуры

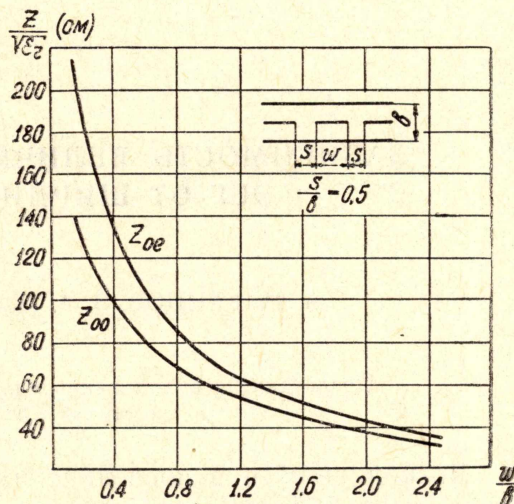


Рис. 6. Зависимость волновых сопротивлений четного  $Z_{0e}$  и нечетного  $Z_{0o}$  возбуждения меандровой линии от  $w/b$  при  $s/b = 0.5$  (диэлектрик—воздух)

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Воробьеву П. А. за полезные советы и помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Pregla. Mäanderleitung als Laufzeitausgleichsschaltung. AEU, 1967, 21, № 5, 219—227.
2. В. И. Лаврик, В. Н. Савенков. Справочник по конформным отображениям. Киев, «Наукова думка», 1970.
3. А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. Синтез четырехполюсников и восьми-полюсников на СВЧ. М., «Связь», 1971.